

OPTIMASI PARAMETER PROSES PEMOTONGAN STAINLESS STEEL SUS 304 UNTUK KEKASARAN PERMUKAAN DENGAN METODE RESPONSE SURFACE

Endang Pudji Purwanti¹, Ferihan Pilarian²,

¹ Politeknik Perkapan Negeri Surabaya, ² PT. Alhas Jaya Group

¹endangpudjip@gmail.com, ²ferihanpilarain@yahoo.co.id

Abstrak

Stainless steel adalah salah satu material yang tahan karat dan digunakan sangat luas yaitu mulai dari peralatan rumah tangga sampai segala bentuk produk industri. Pada industri manufaktur cara pemotongan material menggunakan *Laser cutting*, yang mempunyai keunggulan. Dengan kategori pemotongan laser yang digunakan memotong metal yaitu kategori *High pressure cutting* merupakan bagian dari laser *fusion cutting* dimana nitrogen bertekanan 5-7 Bar digunakan sebagai gas pemotong. Gas tekanan tinggi ini menyebabkan lelehan terpisah dengan cepat dari kerf. Pemotongan ini khusus digunakan untuk pemotongan material *stainless steel* dan paduan aluminium.

Terdapat tiga komponen untuk campuran gas laser : CO₂, helium dan nitrogen, gas-gas ini menghasilkan sinar laser. Dalam pemotongan *stainless steel* atau aluminium, gas dominannya adalah nitrogen. Untuk mengetahui kekasaran dari hasil pemotongan *stainless steel* SUS 304 6mm digunakan kombinasi komposisi gas CO₂, nitrogen, helium, dengan metode *high pressure cutting*. Dalam hal ini ditentukan parameter-parameter untuk eksperimen dan dianalisa dengan cara *Respon Surface* dan *Box-behen*.

Hasil kekasaran minimum dari proses pemotongan *stainless steel* SUS 304 6mm dengan menggunakan komposisi gas sebagai berikut : Carbon dioksida (CO₂) sebesar 5 bar, Helium (He) sebesar 5 bar, dan Nitrogen (N₂) sebesar 5 bar menghasilkan kekasaran 1,54 (µm).

Kata kunci: *Box-behen, High pressure cutting, Laser, Respon Surface,*

A. PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang cepat dan permintaan pasar terhadap material yang tahan karat dari jenis metal yaitu stainless steel juga besar, diperlukan mesin pemotong metal, dengan mesin sinar laser. Teknik pemotongan laser mempunyai beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan metode konvensional seperti pemotongan dengan menggunakan las. Kelebihan pemotongan laser antara lain : Ketepatan pengerjaan lebih baik, proses pemotongan material lebih presisi, dapat memotong beberapa bahan yang sangat sulit atau yang tidak mungkin untuk dipotong dengan cara yang konvensional, dapat meningkatkan kualitas material yang di potong, mengingat pada waktu pemotongan digunakan gas oksigen, helium, nitrogen dengan kecepatan yang tinggi, sehingga didapatkan hasil pemotongan material yang lebih halus dan presisi. Selain itu teknik pemotongan laser lebih mudah diintegrasikan dengan komputer karena dapat dikontrol secara numerik. Hal ini yang mendorong penulis untuk melakukan penelitian "Optimasi parameter proses pemotongan *stainless steel* 304 untuk kekasaran permukaan dengan metode respon surface" *Laser cutting* bekerja dengan cara mengarahkan laser berkekuatan tinggi untuk memotong material dan digunakan komputer untuk mengarahkannya.

Klasifikasi Pemotongan Laser

Terdapat 3 kategori pemotongan dengan laser yaitu :

- Laser *sublimation cutting* mempunyai prinsip meleburkan material dengan panas yang dihasilkan oleh sinar laser. Laser *sublimation cutting* digunakan dalam pemotongan kayu, kertas, plastik. Diperlukan intensitas laser yang cukup tinggi untuk menjaga hilangnya konduktifitas panas
- Laser *fusion cutting* menggunakan sinar laser untuk melelehkan material pada proses pemotongan dan gas mulia yang digunakan adalah N_2 , Ar dihembuskan dan dapat menyingkirkan material yang sudah mencair. Laser *fusion cutting* ini biasanya digunakan dalam pemotongan kaca, plastik, metal.
- High pressure cutting merupakan bagian dari laser *fusion cutting* dimana nitrogen bertekanan 5-7 Bar digunakan sebagai gas pemotong. Gas tekanan tinggi ini menyebabkan lelehan terpisah dengan cepat dari kerf. Pemotongan jenis ini mampu menghilangkan formasi getaran dan mencegah lelehan melekat terhadap pemotongan sisi. Saat nitrogen digunakan sebagai gas pemotong tidak adanya oksidasi yang mempengaruhi potongan tepi. Pemotongan ini khusus digunakan untuk pemotongan material *stainless steel* dan paduan aluminium
- Laser flame cutting Pada laser gas cutting jenis ini mempunyai prinsip kerja yang hampir sama dengan 2 tipe diatas tetapi yang membedakannya adalah penggunaan dari gas pemotong, dimana pada jenis ini pemotongan dilakukan dengan O_2 , dimana gas ini di semprotkan dari awal pemotongan untuk mempercepat reaksi eksotermis pada benda kerja.

Parameter Proses

Parameter proses merupakan karakteristik dari proses pemotongan laser yang dapat diubah supaya mendapatkan hasil pemotongan yang diperlukan.

Gas Assistance

Pada mesin laser CO_2 , terdapat gas laser dan gas assist. Umumnya ada tiga komponen untuk campuran laser gas: CO_2 , helium dan nitrogen. Gas-gas ini menghasilkan sinar laser dan gas yang berfungsi untuk membantu menghilangkan logam dari bekas pemotongan adalah oksigen, nitrogen atau udara terkompresi. Pada metal *stainless steel* dan aluminium, gas assist adalah nitrogen, yang berfungsi untuk memanaskan permukaan material dan pada saat proses pemotongan. Tekanan udara dapat digunakan untuk memotong baja, *stainless steel*, aluminium dan bahkan titanium sehingga zona yang terkena panas dampaknya tidak kritis. Sebagai campuran sekitar 80 % nitrogen dan 18 % oksigen, udara tekan digunakan sebagai gas laser assist. (Charles, 2004).

Stainless Steel SUS 304

Stainless Steel (SS) adalah paduan besi dengan minimal 12 % kromium. Komposisi ini membentuk *protective layer* (lapisan pelindung anti korosi) yang merupakan hasil oksidasi oksigen terhadap krom yang terjadi secara spontan. *Stainless steel* terbagi dalam 5 golongan yaitu Austenitic, Ferritic, Martensitic, Duplex, dan Precipitation Hardening *stainless steel*. Sedangkan kelas 304 tergolong sebagai Austenitic *stainless steel* dimana austenitic mengandung sedikitnya 16% Chrom dan 6% Nickel (grade standar untuk 304), sampai ke grade Super Austenitic SS seperti 904L (dengan kadar Chrom dan Nickel lebih tinggi serta unsur tambahan Molybdenum sampai 6%). Molybdenum (Mo), Titanium (Ti) atau Copper (Co) berfungsi untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur serta korosi. Austenitic cocok juga untuk aplikasi temperatur rendah disebabkan unsur nikel membuat *Stainless steel* tidak menjadi rapuh pada temperatur rendah. (Sites.google.com. 2012).

Pengkodean SUS didasarkan pada JIS (Japanese Industrial Standarts) dimana standarisasi dari Jepang yang setara dengan AISI (American Iron Steel Institute). Untuk penggolongan *stainless*

steel biasanya menggunakan grade dari ASTM (American Society for Testing Materials) dengan menggunakan kode huruf SUS diikuti dengan kode angka sesuai AISI tersebut.

Kelas 304 merupakan jenis stainless steel yang paling fleksibel dan banyak digunakan. Komposisi, sifat mekanik, dan sifat fisika material 304 dapat dilihat pada Tabel 1,2 dan 3 berikut.(azom.com.2012).

Tabel 1. Komposisi Material 304.

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
304	Min.	-	-	-	-	-	18.0	-	8.0	
	Max.	0.08		2.0	0.75	0.045	0.030	-	10.5	0.10

Tabel 2. Sifat Mekanik Material 304.

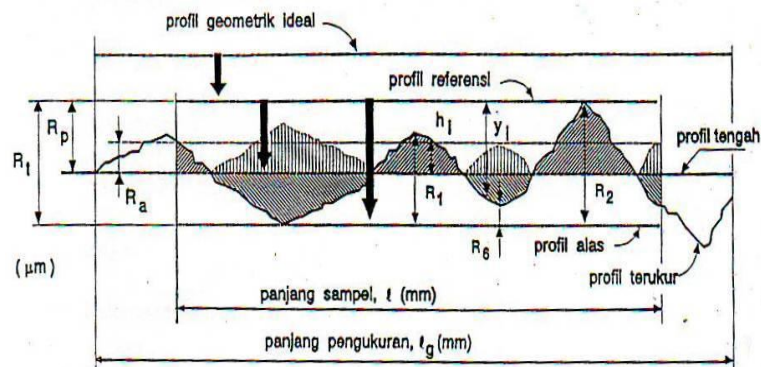
Grade	Tensile Strength(Mpa) min	Yield Strength 0.2% Proof(Mpa) min	Elongation(% in 50mm) min	Hardness	
				Rockwell B (HR B) max	Brinell(HB) max
304	515	205	40	92	201

Tabel 3 Sifat Fisika Material 304.

Grade	Densit y (kg/m ³)	Elastic Modulu s (Gpa)	Mean Coefficien of Termal Expansion($\mu\text{m}/\text{m}/\text{oC}$)			Thermal Conductivity(W/m.K)		Specific Heat 0 - 100°C (J/kg.K)	Electrical Resistivit y($\text{n}\Omega.\text{m}$)
			0 - 100°C	0 - 315°C	0 - 538°C	at 100°C	at 500°C		
304/L/H	8000	193	17.2	17.8	18.4	16.2	21.5	500	720

Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan proses pemesinan adalah harga kekasaran rata-rata aritmatika (R_a) dari garis rata-rata profil. Posisi R_a dan parameter kekasaran yang lain, bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat seperti pada Gambar 1. (Rochim, 1993).



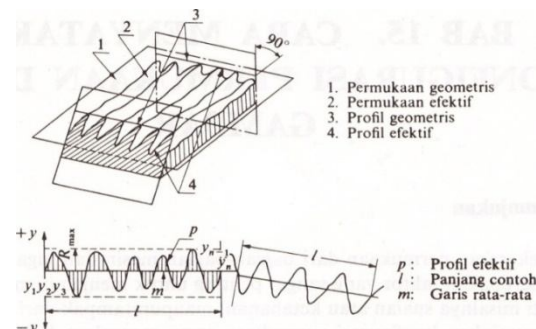
Gambar 1 Parameter dalam profil permukaan

Kekasaran permukaan ditunjukkan oleh sepuluh titik ketinggian dari ketidakrataan (R_z), atau ketinggian maksimum dari ketidakrataan secara konvensional (R_{max}). Definisi dari ketiga macam kekasaran permukaan tersebut adalah sebagai berikut (Sato dan Sugiarto, 1994):

Penyimpangan Rata-Rata Aritmatika dari Garis Rata-Rata Profil (R_a)

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) adalah harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif

oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penyimpangan rata-rata aritmatika

Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum R_a dirumuskan:

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (1)$$

dimana:

R_a = nilai kekasaran aritmatika

y_i = tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba

n = frekuensi pengukuran

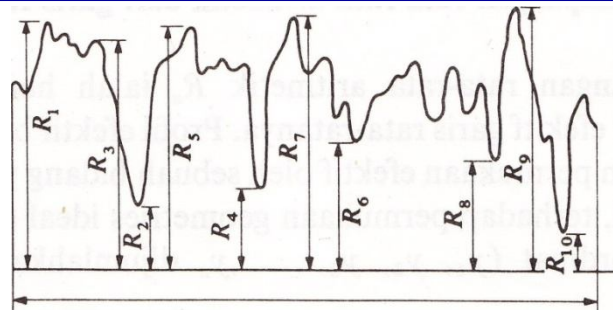
Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran

Kekasaran, $R_a(\mu m)$	Tingkat Kekasaran	Panjang Sampel
50	N12	8
25	N11	
12.5	N10	2.5
6.3	N9	
3.2	N8	0.8
1.6	N7	
0.8	N6	
0.4	N5	
0.2	N4	0.25
0.1	N3	
0.05	N2	
0.025	N1	0.08

Ketidakrataan Ketinggian Sepuluh Titik (R_z)

Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik (R_z) adalah jarak rata-rata antara lima puncak tertinggi dan lima lembah terdalam antara panjang sampel yang diukur dari garis yang sejajar dengan garis rata-rata dan tidak memotong profil tersebut seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.



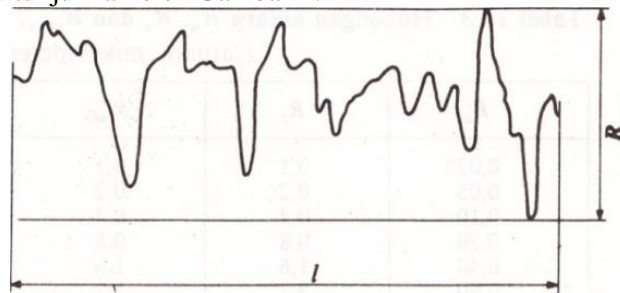
Gambar 3 Ketidakrataan Ketinggian Sepuluh Titik

Harga R_z ditulis dengan rumus:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + \dots + R_9) - (R_2 + R_4 + \dots + R_{10})}{5} \quad (2)$$

Ketidakrataan Ketinggian Maksimum (R_{\max})

Ketidakrataan ketinggian maksimum (R_{\max}) adalah jarak antara dua garis sejajar dengan garis rata-rata dan menyinggung profil pada titik tertinggi dan titik terendah dalam panjang sampel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4 Ketidakrataan Ketinggian Maksimum.

Hubungan antara R_a , R_z , dan R_{\max} tidak mudah ditentukan karena profil permukaan mempengaruhi hubungannya. (Sato dan Sugiarto, 1994).

Panjang sampel yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan R_z dan R_{\max} secara rinci ditunjukkan oleh Tabel 6. sesuai dengan standar JIS 0601. Dalam hal pengukuran R_a , panjang sampel diambil tiga kali atau lebih dari harga bulat tersebut. Harga bulat standar adalah 0.8 mm.

Tabel 6. Hubungan antara Panjang Sampel L dan Kekasaran Permukaan

R_z (μm)	R_{\max} (μm)	L (mm)
-	< 0.8	0.25
0.8 <	< 6.3	0.8
6.3 <	< 25	0.25
25 <	< 100	8

R_a merupakan parameter yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan. Parameter R_a cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang dihasilkan dalam jumlah banyak. Parameter R_a lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan bila dibandingkan dengan parameter kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian, pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja (Rochim, 1993).

Metode Pengukuran

Banyak cara yang bisa dilakukan untuk memeriksa tingkat kekasaran permukaan. Cara yang paling sederhana adalah dengan meraba permukaan yang diperiksa dan dengan menggunakan peralatan yang dilengkapi dengan jarum peraba (*stylus*). Proses pengukurannya dikelompokkan : pengukuran permukaan secara tak langsung antara lain yaitu dengan meraba (*touch inspection*), dengan melihat/mengamati (*visual inspection*), dengan menggaruk (*scratch inspection*), dengan mikroskop (*microscopic inspection*) dan dengan potografi permukaan (*surface photographs*), dan pengukuran permukaan secara langsung.

Pengertian Metode *respon surface*

Metode *response surface* adalah suatu kumpulan dari teknik-teknik statistika dan matematika yang berguna untuk meningkatkan, mengembangkan dan mengoptimalkan suatu proses. Metode *response surface* digunakan untuk menghasilkan kondisi optimum yang dinamis (Douglas, 1991).

Perancangan eksperimen statistika merupakan suatu proses perencanaan eksperimen untuk memperoleh data yang tepat sehingga dapat dianalisa dengan metode statistik serta kesimpulan yang diperoleh dapat bersifat obyektif dan valid. Salah satu metoda perancangan eksperimen yang digunakan untuk mengetahui kondisi optimal adalah Metode Response Surface. Metode ini menggabungkan teknik matematika dengan teknik statistika yang digunakan untuk membuat dan menganalisa suatu respon kekasaran permukaan (Y) yang dipengaruhi oleh tiga variabel bebas yaitu faktor gas Nitrogen (X_1), gas CO_2 (X_2), dan gas Helium (X_3) guna mengoptimalkan respon tersebut. Hubungan antara respon Y dan variabel bebas dapat dirumuskan sebagai

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) + a \quad (3)$$

dimana:

Y = variabel respon

X_i = variabel bebas/faktor ($i = 1, 2, 3, \dots, k$)

\hat{a} = error

$\beta(0, 1, 2, 3, \dots, k)$ = variable model

Hubungan antara Y dan X_i didapat dengan menggunakan model orde pertama dan orde kedua, dimana model orde pertama digunakan untuk mencari daerah optimal dan model orde kedua digunakan untuk mencari titik optimal. Hubungan antara Y dan X_i untuk model orde pertama dapat ditulis dengan rumus :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (4)$$

Sedangkan model orde kedua dapat ditulis dengan rumus:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (5)$$

B. METODE PENELITIAN

Untuk mengetahui bagaimana hasil pemotongan stainless steel SUS 304 6 mm menggunakan laser dengan kombinasi komposisi gas CO_2 , Nitrogen, Helium, diperlukan :

Persiapan spesimen material

Tahapan dalam melakukan uji komposisi material yaitu :

- Pemotongan material dan pengujian spesimen dengan dimensi pemotongan 85mm x 17mm x 6mm.(gambar 5)



Gambar 5. Material Percobaan, hasil pemotongan spesimen

- Hasil uji komposisi material akan di dapatkan hasil komposisi material untuk stainless steel SUS 304 seperti pada gambar 8

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	69.8	0.0481	0.318	1.62	0.0199	< 0.0005	18.6	0.277
2	69.9	0.0363	0.307	1.64	0.0192	< 0.0005	18.5	0.273
3	70.0	0.0297	0.304	1.65	0.0199	< 0.0005	18.5	0.275
Ave	69.9	0.0380	0.310	1.64	0.0197	< 0.0005	18.5	0.275
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	8.43	0.0043	0.185	0.257	0.0163	0.0036	0.0716	0.0529
2	8.42	0.0035	0.184	0.257	0.0200	0.0031	0.0729	0.0516
3	8.41	0.0032	0.184	0.256	0.0172	0.0026	0.0710	0.0511
Ave	8.42	0.0036	0.184	0.257	0.0178	0.0031	0.0718	0.0519
	Pb	Sn	B	Ca	N	Se	Sb	Ta
1	< 0.0010	0.0046	0.0001	0.0016	0.189	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
2	< 0.0010	0.0047	0.0001	0.0010	0.132	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
3	< 0.0010	0.0049	0.0001	0.0006	0.125	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
Ave	< 0.0010	0.0047	0.0001	0.0011	0.149	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046

Gambar 6 Hasil Uji Komposisi

Dari hasil Uji Komposisi dan tabel 1 Komposisi material stainless stell sesuai dengan gradenya.

Desain penelitian

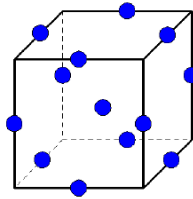
Eksperimen dari parameter-parameter yang ditentukan dianalisa dengan cara *Respon Surface* dan *Box-behken*.

Menurut Vardenman (1998) ada beberapa hal yang perlu diperhatikan jika melakukan teknik analisa *respon surface*. Hal pertama yang perlu adalah bentuk persamaannya apakah merupakan fungsi berorde satu atau fungsi berorde dua. Untuk fungsi yang berorde, rancangan percobaannya cukup dengan menggunakan 2^k faktorial dimana setiap perlakuan memiliki dua level perlakuan. Jika dibandingkan dengan rancangan *respon surface* yang berorde dua, maka rancangan *respon surface* berorde satu lebih sedikit membutuhkan unit percobaan, yaitu sebanyak 2^k unit percobaan dimana k menyatakan banyaknya faktor perlakuan.

Untuk *respon surface* yang berorde dua, rancangan percobaannya bisa menggunakan *central composite design* (CCD) dan *Box-behken design* (BBD) Yang memerlukan jumlah unit percobaan lebih banyak daripada rancangan 2^k faktorial (*respon surface* berorde satu). Dalam eksperimen ini digunakan *Box-behken design* (Douglas,1991).

Box-behken design

Salah satu perbedaan box-behken design dengan central composite design adalah pada box-behken design tidak ada axial/star runs pada rancangannya. Tidak adanya axial/star runs ini menyebabkan box-behken lebih efisien dalam rancangan, karena melibatkan lebih sedikit unit percobaan. pada dasarnya box-behken dibentuk berdasarkan kombinasi rancangan 2^k dengan incomplete black design dengan menambahkan center run pada rancangannya menurut (Douglas,1991). Gambar 7 merupakan visual untuk rancangan *box-behken* dengan 3 faktor.

Gambar 7. *Box-Behnken* untuk Tiga Faktor

Rancangan *box-behnken* hanya dapat diterapkan pada percobaan yang memiliki minimal 3 faktor, dengan elemen penyusunnya sebagai berikut:

- Rancangan 2^k faktorial *incomplete block design*, dimana k adalah banyaknya faktor, yaitu percobaan pada titik $(0, \pm 1, \dots, \pm 1)$, $(\pm 1, 0, \dots, \pm 1)$, $(\pm 1, \pm 1, \dots, 0)$.
- *Center runs* (n_c), yaitu percobaan pada titik pusat $(0, 0, \dots, 0)$, dimana jumlah *center runs* minimal 3 untuk berbagai jumlah faktor k .

Variabel tak bebas : Kekasaran permukaan.

Variabel bebas: Gas CO_2 , Nitrogen, Helium

Level yang digunakan : 5 bar, 6 bar, 7 bar.

Tabel 7. Variabel Eksperimen

Percobaan	Tekanan gas (bar)		
	$\text{CO}_2 (X_1)$	$\text{He} (X_2)$	$\text{N}_2 (X_3)$
1	5	5	6
2	7	5	6
3	5	7	6
4	7	7	6
5	5	6	5
6	7	6	5
7	5	6	7
8	7	6	7
9	6	5	5
10	6	7	5
11	6	5	7
12	6	7	7
13	6	6	6
14	6	6	6
15	6	6	6

proses pengukuran R_a untuk mengetahui tingkat kekasaran hasil pemotongan



Gambar 8 Proses Pengukuran Material

Proses pengukuran maka nilai kekasaran dari proses pemotongan laser (R_a) dapat diketahui

Analisa dan Pengujian

Karena tidak diketahui hubungan fungsional yang tepat antara parameter respon dengan parameter bebas, maka dilakukan pengujian sebagai berikut :

- **uji *lack of fit***

Untuk menguji model apakah sudah sesuai dengan model yang diduga atau belum, maka dilakukan uji terhadap ada atau tidaknya *lack of fit* dalam model tersebut. Hipotesis yang perlu diuji adalah sebagai berikut:

- H_0 : tidak ada *lack of fit* dalam model
- H_1 : ada *lack of fit* dalam model

$$\text{Statistik ujinya dengan rumus : } F_{hitung} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (6)$$

Untuk pengujian ini digunakan tabel ANAVA seperti ditunjukkan pada tabel 8 dengan kriteria atau penerimaannya:

- H_0 ditolak jika $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti ada *lack of fit*, yaitu ada ketidak sesuaian antara model yang diduga dengan model sebenarnya.
- H_1 diterima jika $F_{hitung} < F_{tabel}$, yang berarti tidak ada *lack of fit*, yaitu ada kesesuaian antara model yang diduga dengan model sebenarnya.

Tabel 8. ANAVA untuk uji signifikansi regresi disain eksperimen.

Sumber Variasi	db	Jumlah Kuadrat	Rata-rata Kuadrat	F _{rasio}
Regresi	k	$SS_R = b'X'Y - n\bar{Y}^2$	$MS_R = \frac{SS_R}{k}$	$\frac{MS_R}{MS_E}$
Residual	$n - k - 1$	$SS_E = Y'Y - b'X'Y$	$MS_E = \frac{SS_E}{(n - k - 1)}$	
Lack of fit	$n - k - 1 - n_e$	$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE}$	$MS_{LOF} = \frac{SS_{LOF}}{(n - k - 1 - n_e)}$	$\frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}$
Pure error	n_e	$SS_{PE} = \sum_{j=1}^m \sum_{u=1}^{n_j} (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2$	$MS_{PE} = \frac{SS_{PE}}{n_e}$	
Total	$n - 1$	$SS_T = Y'Y - n\bar{Y}^2$		

Dimana :

k = Jumlah parameter regresi n = banyaknya pengamatan
 n_e = (banyak pengulangan – 1)

- **Pengujian koefisien determinasi berganda (R^2)**

Koefisien determinasi (R^2) sering digunakan untuk mengukur kecukupan atau ketepatan model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 sampai 100% di mana semakin mendekati nilai 100% maka model semakin baik. Rumusnya adalah sebagai berikut :

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \quad (7)$$

- **Pengujian koefisien regresi secara serentak**

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan apakah terjadi hubungan linier antara parameter tidak bebas (Y) dengan parameter bebasnya (X_1, X_2, X_3).

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

(semua parameter regresi bernilai 0, yaitu semua parameter bebas tidak berpengaruh terhadap parameter respon)

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \beta_i \neq 0$$

(sedikitnya ada satu parameter bebas yang berpengaruh terhadap parameter respon).

Statistik ujinya dengan rumus :

$$F_{hitung} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (8)$$

- H_0 ditolak jika $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti model dapat diterima secara statistik dan paling sedikit ada satu parameter bebas yang mempunyai pengaruh nyata terhadap respon.

- H_0 diterima jika $F_{hitung} < F_{tabel}$, yang berarti model tidak dapat diterima secara statistik dikarenakan tidak ada satu-pun parameter bebas yang mempunyai pengaruh nyata terhadap respon.

- **Pengujian koefisien regresi secara individual.**

Pengujian koefisien parameter secara individual ini dimaksudkan untuk menguji regresi y_i pada suatu parameter bebas X_i tertentu, bila parameter bebas X_i dianggap konstan.

Hipotesa yang di uji:

$$H_0 : \beta_i = 0 \rightarrow \text{yaitu } \beta_i \text{ tidak mempengaruhi respon}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \rightarrow \text{yaitu } \beta_i \text{ mempengaruhi respon}$$

Statistik ujinya dengan rumus :

$$T_{hitung} = \frac{b_i}{S(b_i)} \quad (9)$$

- Jika $t_{hitung} > t_{tabel}$, maka H_0 ditolak, yang berarti bahwa parameter bebas (X_i) memberi pengaruh nyata pada perubahan respon Y.

- Jika $t_{hitung} < t_{tabel}$, maka H_0 diterima, yang berarti bahwa parameter bebas (X_i) tidak memberi pengaruh nyata pada perubahan respon Y.

- **Pengujian asumsi residual**

Residual merupakan perbedaan antara nilai observasi dengan nilai estimasi yang dinyatakan dengan rumus :

$$\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

Dimana : Y_i adalah data yang dihasilkan dari pengamatan

\hat{Y}_i adalah nilai estimasi dari garis regresi.

Nilai residual harus memiliki sifat identik, independen, dan probabilitas normal.

- **Uji identik**

Uji ini dilakukan untuk mengetahui apakah penyebaran residualnya acak atau mengikuti pola tertentu. Hal ini dapat diketahui dari plot antara residual dengan harga taksiran (\hat{Y}). Apabila dalam plot tersebut tidak menunjukkan kecenderungan naik atau turun (nilai residualnya menyebar secara acak), maka residual dikatakan identik.

- **Optimasi nilai kekasaran permukaan**

Dengan model yang sudah sesuai, optimasi ditunjukkan untuk memperoleh nilai minimal dari kekasaran permukaan dari proses pemotongan laser dengan menggunakan *non-linear programming*. Sebagai respon adalah nilai kekasaran permukaan. Model matematika tersebut sebagai berikut :

Fungsi tujuan adalah meminimumkan nilai kekasaran permukaan:

$$Y_{\min} = Y_{k_p} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3$$

Sebagai kendala adalah tekanan gas potong, yaitu :

$$Y_{\text{sekunder}} = Y_{\text{ig}} \leq b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$$

Batasan nilai parameter gas laser pemotongan adalah sebagai berikut:

$$5 \leq X_1 \leq 7 \quad X_1 = \text{Co}_2 \text{ (carbon)}$$

$$5 \leq X_2 \leq 7 \quad X_2 = \text{He (helium)}$$

$$5 \leq X_3 \leq 7 \quad X_3 = \text{N}_2 \text{ (nitrogen)}$$

Penarikan kesimpulan dari analisa dan pengujian

C. HASIL DAN ANALISA PEMBAHASAN

Untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter tekanan gas terhadap kekasaran permukaan, maka data pada tabel 9 dianalisa.

Tabel 9 Nilai kekerasan permukaan (Ra)

Percobaan	Tekanan gas			Rata-Rata Ra			Rata-rata akhir
	CO ₂	He	N ₂	1	2	3	
1	5	5	6	2,95	2,70	2,66	2,77
2	7	5	6	2,02	2,03	2,02	2,02
3	5	7	6	1,83	1,88	1,84	1,85
4	7	7	6	2,73	2,74	2,71	2,73
5	5	6	5	2,56	2,65	2,34	2,52
6	7	6	5	2,89	2,85	2,86	2,86
7	5	6	7	2,12	2,13	2,13	2,12
8	7	6	7	2,12	2,13	2,13	2,12
9	6	5	5	2,18	2,20	2,18	2,19
10	6	7	5	2,54	2,51	2,49	2,52
11	6	5	7	2,15	2,19	2,16	2,17
12	6	7	7	2,01	2,04	2,05	2,03
13	6	6	6	2,51	2,53	2,52	2,52
14	6	6	6	2,85	2,71	2,40	2,65
15	6	6	6	2,46	2,37	2,46	2,43

Response Surface Regression: hasil versus Co2; He; N2

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for hasil

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-29,2030	3,65364	-7,993	0,000
Co2	3,5000	0,59351	5,897	0,002
He	5,4661	0,59351	9,210	0,000
N2	1,5603	0,59351	2,629	0,047
Co2*Co2	-0,1028	0,04087	-2,516	0,053
He*He	-0,3484	0,04087	-8,525	0,000
N2*N2	0,0927	0,04087	2,269	0,073
Co2*He	-0,0825	0,03926	-2,101	0,090
Co2*N2	-0,2731	0,03926	-6,955	0,001
He*N2	-0,1581	0,03926	-4,026	0,010

S = 0,0785260 PRESS = 0,305888

R-Sq = 97,77% R-Sq(pred) = 77,90% R-Sq(adj) = 93,76%

Dengan hasil analisa koefisien regresi seperti yang tampak pada gambar 9, terlihat parameter yang secara statistik berpengaruh terbesar terhadap kekasaran permukaan adalah gas

CO₂ dan Nitrogen diikuti gas Helium yang mempunyai pengaruh paling kecil terhadap proses pemotongan laser.

Tabel 10. ANAVA untuk Tekanan Gas

Analysis of Variance for hasil						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1,35318	1,35318	0,150353	24,38	0,001
Linear	3	0,39989	0,62432	0,208108	33,75	0,001
Square	3	0,52789	0,52789	0,175965	28,54	0,001
Interaction	3	0,42539	0,42539	0,141796	23,00	0,002
Residual Error	5	0,03083	0,03083	0,006166		
Lack-of-Fit	3	0,01720	0,01720	0,005734	0,84	0,583
Pure Error	2	0,01363	0,01363	0,006815		
Total	14	1,38401				

Sedangkan pada tabel 10, yaitu tabel ANAVA hasil dari data tekanan gas, dapat dilihat untuk beberapa pengujian :

Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mendapatkan kesesuaian model tersebut dilakukan dengan uji *lack of fit* dan uji koefisien determinasi (R^2):

Uji *Lack of Fit*

Pada level pengujian dengan $\alpha = 0,05$, nilai P dari *lack of fit* adalah 0,583, yang berarti H_0 diterima. Dengan demikian tidak terjadi *lack of fit* pada pendugaan model, sehingga pendugaan model ini memenuhi.

Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Prosentase dari total variasi yang dapat diterangkan oleh model (R^2) sebesar 97,77%. Nilai ini cukup besar, yang berarti bahwa pendugaan model telah memenuhi. (gambar 9)

Pengujian Koefisien Regresi

Uji Koefisien Regresi secara Serentak

Hipotesa untuk koefisien regresi secara serentak dari tekanan gas adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_i tidak mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan

H_1 : Paling tidak ada satu β_i yang mempengaruhi kekasaran permukaan

Dengan level pengujian $\alpha = 0.05$, nilai P pada analisa regresi = 0,268 yang berarti lebih besar dari 0.05, sehingga H_0 ditolak. Dengan demikian paling tidak ada satu β_i yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan.

Nilai P dari regresi bagian linier dan kuadratiknya nilainya lebih kecil dari 0.05, sedang pada interaksi nilai P lebih besar. Ini artinya hubungan linier dan kuadratiknya dari parameter-parameter proses mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap proses pemotongan yang dihasilkan.

Uji Koefisien Regresi secara Individu

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara individu dari model tekanan gas (gambar 9) adalah sebagai berikut:

H_0 : $b_i = 0$ untuk setiap i

H_1 : $b_i \neq 0$ untuk setiap i

Pada level pengujian dengan $\alpha = 0,05$, nilai P untuk X_1 , X_2 , X_3 , $(X_1)^2$, $(X_2)^2$, $(X_3)^2$ dan interaksi $X_2 \times X_3$ mempunyai nilai lebih kecil dari 0,05, yang berarti H_0 ditolak. Dengan demikian parameter-parameter X_1 , X_2 , X_3 kuadrat dari masing-masing parameter, dengan interaksi $X_1 \times X_1$, $X_1 \times X_3$ dan $X_3 \times X_3$ mempunyai nilai P lebih besar dari 0,05 yaitu 0,053, 0,090 dan 0,073 sehingga H_0 ditolak. Ini artinya interaksi $X_1 \times X_2$ atau CO₂ * He, $X_1 \times X_3$ atau CO₂ * N₂ atau dan $X_3 \times X_3$ atau N₂ * N₂ tidak berpengaruh.

Dari hasil analisa di atas (gambar 9) berarti terdapat 3 faktor interaksi yang tidak mempunyai pengaruh signifikan terhadap distorsi sudut yang terjadi. Jika tiga faktor tersebut dihilangkan, maka diperoleh data analisa baru seperti ditunjukkan pada gambar 10 dan tabel 11 berikut ini

Response Surface Regression: hasil versus Co2; He; N2

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for hasil

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-25,8494	4,10051	-6,304	0,000
Co2	1,7711	0,39199	4,518	0,002
He	4,9625	0,89620	5,537	0,001
N2	2,6731	0,55246	4,838	0,001
He*He	-0,3477	0,06716	-5,177	0,001
Co2*N2	-0,2731	0,06488	-4,208	0,003
He*N2	-0,1581	0,06488	-2,436	0,041

S = 0,129767 PRESS = 0,570896

R-Sq = 90,27% R-Sq(pred) = 58,75% R-Sq(adj) = 82,97%

Gambar 10 Hasil analisa dari koefisien regresi (revisi)

Tabel 11. ANAVA untuk Tekanan Gas (revisi)

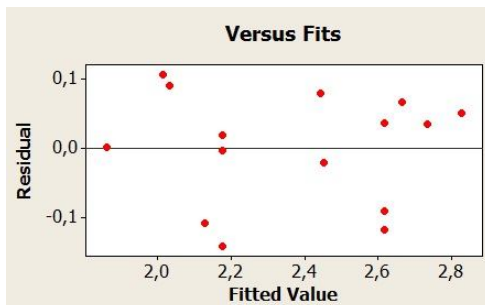
Analysis of Variance for hasil

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	1,29420	1,29420	0,184886	14,41	0,001
Linear	3	0,39989	0,79858	0,266192	20,75	0,001
Square	2	0,49614	0,49614	0,248072	19,34	0,001
Interaction	2	0,39816	0,39816	0,199082	15,52	0,003
Residual Error	7	0,08981	0,08981	0,012830		
Lack-of-Fit	5	0,07618	0,07618	0,015235	2,24	0,337
Pure Error	2	0,01363	0,01363	0,006815		
Total	14	1,38401				

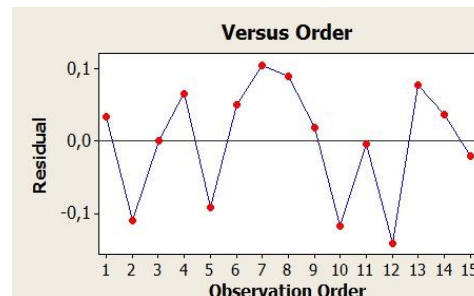
Uji Identik

Asumsi identik dapat diketahui dari plot antara residual dengan Y estimasi. Apabila pola tersebut menyebar dan tidak identik membentuk pola tertentu, maka dapat dikatakan bahwa residual bersifat identik. Gambar 12 tidak menunjukkan adanya pola tertentu dan mengindikasikan penyebaran yang merata, sehingga ini dapat diartikan bahwa residual dari tekanan gas tidak memiliki penyebaran yang sama. Dengan demikian asumsi identik dapat dipenuhi, sehingga model sudah memenuhi.

Residual versus the fitted values



Residual versus the order of the data



Gambar 12 (a) *Residual-fitted* values dan (b) *Residual-order* dari tekanan gas Uji independen

Dari analisa dengan minitab diperoleh nilai uji statistik durbin-watson = 1,75 untuk ukuran sample 15, dengan level signifikan 0.05 dan jumlah parameter proses 3, diperoleh batas bawah 0,82 dan batas atas 1,75 . Oleh karena batas atas sama nilainya yaitu 1,75 maka

asumsi independen terpenuhi. Dengan demikian tidak ada korelasi dari pengamatan yang berurutan, sehingga asumsi independen dipenuhi.

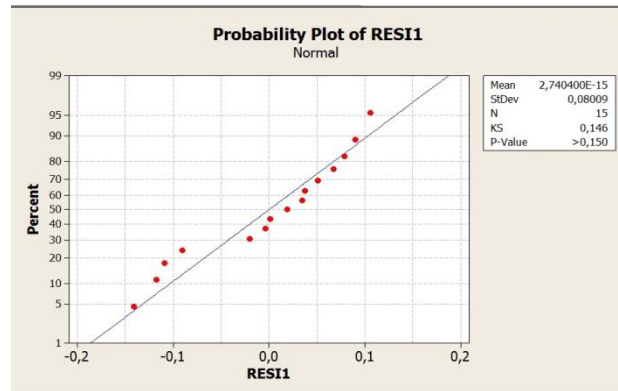
Uji Kenormalan

Hipotesis untuk uji kenormalan dari residual adalah sebagai berikut :

Ho : residual berdistribusi normal.

H1 : Residual tidak berdistribusi normal

Uji kenormalan *kolmogorov-smirnov*
Probability plot of residual kekasaran permukaan



Gambar 13 Uji kenormalan residual model respon permukaan kekasaran permukaan

Berdasarkan tabel uji statistik *kolmogorov-smirnov* untuk $\alpha = 0.05$, dengan jumlah eksperimen 15 kali pengamatan (box-behnken), maka nilainya adalah = 0.338 gambar 13 menunjukkan hasil statistik *kolmogorv-smirnov* dan P-value untuk uji distribusi normal. Nilai statistik *kolmogorov-smirnov* adalah 0.146 dan nilai P pada uji normal residual melebihi 15%, sehingga Ho diterima. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas dipenuhi.

Penentuan Titik Minimum pada Model Kekasaran Permukaan

Untuk mengetahui nilai optimum dari kekasaran permukaan yang terjadi pada proses pemotongan laser dengan tekanan gas (CO_2 , He, N_2) sebesar 5 bar – 7 bar maka digunakan bantuan perangkat lunak LINGO 11. Model minimasi yang digunakan dapat dilihat pada gambar 14.

Local optimal solution found.		
Objective value:		1.656700
Infeasibilities:		0.000000
Extended solver steps:		2
Total solver iterations:		11

Variable	Value	Reduced Cost
X1	5.000000	0.000000
X2	5.000000	0.000000
X3	5.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
KEKASARAN_PERMUKAAN	1.656700	-1.000000
2	0.000000	-0.6251000
3	2.000000	0.000000
4	0.000000	-0.7112000
5	2.000000	0.000000
6	0.000000	-0.5171000
7	2.000000	0.000000

Gambar 14 Hasil Perhitungan Nilai Optimum pada Kekasaran Permukaan

Validasi Model Kekasaran Hasil Pemotongan Laser

Untuk mengetahui sejauh mana ketepatan dari nilai-nilai minimum kekasaran hasil pemotongan laser, maka dilakukan validasi terhadap nilai-nilai parameter yang sesuai dengan hasil optimasi yaitu nilai parameter yang minimum. Dari hasil optimasi yang dilakukan diperoleh tekanan gas dengan tekanan CO_2 He N_2 5,5,5 (bar). Dengan hasil kekasaran permukaan yang diperoleh 1,54 (μm).

Untuk menguji apakah nilai kekasaran permukaan yang dihasilkan masih sesuai dengan nilai optimasi yang diharapkan, maka perlu dilakukan uji statistik dari data tersebut. Hipotesa untuk kekasaran permukaan yang terjadi dinyatakan sebagai :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_0 (\mu_0 = 1,65 [\mu\text{m}])$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_0 (\mu_0 = 1,65 [\mu\text{m}])$$

Dengan melakukan uji t, dengan menggunakan perangkat lunak MINITAB 15 pada *confidence interval* sebesar 93%, maka diperoleh keluaran seperti ditunjukkan pada tabel 12

Tabel 12 Hasil Uji T Kekasaran Permukaan dari Hasil Eksperimen Ulang

One-Sample T: Hasil

Test of $\mu = 1,66$ vs $\text{not} = 1,66$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Hasil	5	1,5360	0,1094	0,0489	(1,4002; 1,6718)	2,53	0,064

Dari tabel 12 dapat diketahui bahwa nilai *predicted interval* dari respons adalah 1,40 sampai 1,67. Selain itu juga terlihat nilai t yang diperoleh adalah 2,53 nilai P = 0,064

Yang lebih besar dari $\alpha = 0,05$, maka H_0 diterima. Artinya secara statistik dapat dikatakan bahwa secara rata-rata nilai kekasaran permukaan hasil eksperimen ulang yang dilakukan sama dengan hasil penelitian

D. SIMPULAN DAN SARAN

Hasil kekasaran minimum dari proses pemotongan stainless steel SUS 304 6 mm dengan menggunakan komposisi gas sebagai berikut :

CO_2 (Carbon dioksida) = 5 bar

He (Helium) = 5 bar

N_2 (Natrium) = 5 bar

Dapat menghasilkan nilai kekasaran minimum sebesar 1,54 (μm).

Saran :

Pemilihan parameter proses perlu ditambahkan agar dapat diketahui dengan pasti faktor-faktor yang sangat berpengaruh secara signifikan terhadap proses pemotongan laser.

E. DAFTAR PUSTAKA

Caristan, Charles L 2004 Laser cutting guide for manufacturing ISBN 9780872636866.

Prof. Dr. Sudjana, M.A., M.Sc. 1994 Desain dan analisis edisi III. Bandung: Tarsito.

Laser Cutting, Termuat di <http://en.wikipedia.org>, diakses tgl 27 September 2011 at 12:56.

Stainless steel, Termuat di http://en.wikipedia.org/wiki/Stainless_steel 23 January 2012 at 14:49.

Sites.google.com. 2012. Klasifikasi Stainless Steel.

Montgomery, Douglas C 1991 Design of analysis of experiments ISBN 0471520004.

Rochim, Taufik. 2001. Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik. Bandung: Institut Teknologi Bandung.